

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Vliv spektrálního složení záření na růst rostlin
Influence of the radiation spectral composition on plant growth**

2017

Leona Zemanová

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Leona Zemanová**
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **3907R001 Elektroenergetika**
Téma: **Vliv spektrálního složení záření na růst rostlin**
Influence of the radiation spectral composition on plant growth
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Elektromagnetické záření mající vliv na růst rostlin
2. Vazba mezi energetickými jednotkami a účinností fotosynteticky aktivního záření
3. Zdroje záření podporující růst rostlin
4. Návrh soustavy zářičů pro skleníky
5. Měření fotosynteticky aktivního záření

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)

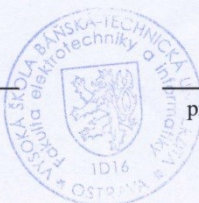
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

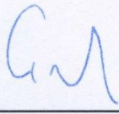
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

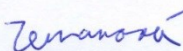



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě dne: 26. dubna 2017


.....
podpis studenta

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu prof. Ing. Karlu Sokanskému CSc. za odborný dohled, cenné připomínky a metodické vedení, jenž mi poskytl při zpracování mé bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této práce je přestavit charakteristické požadavky na osvětlení rostlin a zdroje záření podporující růst rostlin. Část práce se věnuje vazbě mezi energetickými jednotkami a účinností fotosynteticky aktivního záření. Jsou zde také uvedeny světelné veličiny a jejich jednotky, pomocí kterých se posuzuje vhodnost osvětlení pro rostliny. Praktická část práce je věnována návrhu soustavy zářičů pro skleník a dále pak prezentaci a zhodnocení výsledků měření fotosynteticky aktivního záření.

Klíčová slova

Fyziologie rostlin; Fotosyntéza; Světlo; Světelné spektrum; Fotosynteticky aktivní záření; LED; Svítidlo;

Abstract

The aim of this work is to render characteristic requirements for plant lighting and sources of radiation supporting plant growth. Part of the work deals with the connection between energy units and the effectiveness of photosynthetically active radiation. Luminous quantities and their units are also provided to assess the suitability of lighting for plants. The practical part is devoted to the design of the system of emitters for the greenhouse and also to the presentation and evaluation of the results of photosynthetically active radiation measurements.

Key words

Plant physiology; Photosynthesis; Light; Light spectrum; Fotosyntetically active radiation; LED; Lamp

Obsah

Seznam použitých zkratek.....	11
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	12
Úvod.....	14
1 Světlo.....	15
1.1 Undulační teorie.....	15
1.2 Emanační teorie.....	15
1.3 Interference světla.....	15
1.4 Polarizace světla.....	16
2 Fotometrické veličiny.....	17
2.1 Veličiny a jednotky měření světla, spektrum.....	17
2.1.1 Energetická ozáření.....	17
2.1.2 Kvantová ozáření.....	17
2.1.3 Spektrální energetická ozáření.....	17
2.1.4 Spektrální kvantová ozáření.....	17
2.2 Fotometrické jednotky.....	18
2.2.1 Lux.....	18
2.2.2 Lumen.....	18
2.2.3 Kandela.....	18
2.3 Fotometrická křivka.....	18
3 Spektrum a barva světla.....	20
3.1 Chromatičnost a Kolorita, teplota chromatičnosti.....	20
3.2 Sluneční záření.....	21
3.3 Monochromatické záření.....	22

4	Rostlina a záření	23
4.1	Fotosyntéza	24
4.1.1	Foto autotrofní organismy	25
4.1.2	Heterotrofní organismy	25
5	Vyjadření FAR	26
5.1	Měření FAR	27
5.2	Osvětlení vhodné pro růst rostlin	27
6	Světelné zdroje	29
6.1	LED	29
6.1.1	Princip funkce LED	29
6.1.2	Bílé LED	30
6.1.2.1	RGB	30
6.1.2.2	Luminofor	30
6.1.3	Výhody LED žárovek	30
6.1.4	Parametry LED	30
6.1.4.1	Elektrické parametry	30
6.1.4.2	Dosahované parametry LED	31
6.2	Jiné světelné zdroje k osvětlování rostlin	31
6.2.1	Vysokotlaké sodíkové výbojky	31
6.2.2	Halogenidové výbojky	32
6.2.2.1	Princip funkce	32
6.2.2.2	Halogenidové výbojky s křemenným hořákem	32
6.2.2.3	Halogenidové výbojky s keramickým hořákem	33
7	Návrh soustavy zářičů pro skleník	34
7.1	Údaje o svítidle	34
8	Měření fotosynteticky aktivního záření	36
9	Závěr	44
10	Použitá literatura	45

Seznam ilustrací

Obr. 1 Fotometrická křivka [3].....	18
Obr. 2 Porovnání fotopické (černá) a skotopické (zelená) standardní fotomet. křivky [3].....	18
Obr. 3 Kruh barevného spektra [11].....	20
Obr. 4 Vlnové délky jednotlivých složek viditelného spektra [12].....	21
Obr. 5 Spektrum slunečního záření [13].....	22
Obr. 6 Barevné spektrum využívané rostlinami [14].....	23
Obr. 7 FAR vs. Vnímání lidského oka [15].....	24
Obr. 8 Úrovně osvětlení [16].....	27
Obr. 9 Spektrum vlnových délek [17].....	29
Obr.10 Spektrální charakteristika vysokotlaké 600W výbojky [18].....	31
Obr.11 Tech. Parametry výbojek vhodných pro doplňkové osvětlování ve sklenících [19].....	33
Obr.12 Křivka svítivosti.....	35
Obr.13 Foto měřícího stanoviště.....	36
Obr.14 Křivka spektrální charakteristiky pro první měření na bílé LED.....	38
Obr.15 Spektrální charakteristika prvního měření na bílé LED.....	38
Obr.16 Spektrální charakteristika posledního měření na bílé LED.....	39
Obr.17 Křivka spektrální charakteristiky pro první měření na modré LED.....	40
Obr.18 Spektrální charakteristika prvního měření na modré LED.....	40
Obr.19 Spektrální charakteristika posledního měření na modré LED.....	41
Obr.20 Spektrální charakteristika prvního měření na zelené LED.....	42
Obr.21 Spektrální charakteristika posledního měření na zelené LED.....	42
Obr.22 Křivka spektrální charakteristiky pro první měření na zelené LED.....	43

Seznam tabulek

Tab.1 Měření spektrálních charakteristik pro bílé LED.....	37
Tab.2 Měření spektrálních charakteristik pro modré LED.....	39
Tab.3 Měření spektrálních charakteristik pro zelené LED.....	41
Tab.4 Srovnání poměru jednotek.....	43
Tab.5 Tabulka po převodu na bezrozměrné jednotky.....	43

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
FAR	Photosynthetically Active Radiation

Úvod

V této bakalářské práci mám za úkol zjistit dostupné informace o osvětlení rostlin, jaké jsou specifické potřeby rostlin na osvětlení v souvislosti s jejich fyziologií a jaké metody je vhodné využívat pro optimální výsledky při jejich pěstování. Přičemž se dostaneme k otázkám kvantitativního a kvalitativního vývoje rostlin. Po úvodním seznámení s základními informacemi o světle a fyziologii rostlin, navážu přepočty radiometrického výkonu na jednotky fotosyntetický aktivního záření. Provedu sérii měření na prototypovém svítidle a naměřené výstupy budu porovnávat s teoretickými předpoklady. Vyhodnocení naměřených dat, mi bude oporou k správné volbě parametrů při návrhu soustavy zářičů pro skleník. V neposlední řadě si probereme různé druhy svítidel pro osvětlování rostlin a jejich výhody a nevýhody.

1 Světlo

Na zemi dopadá elektromagnetické záření, které se skládá z gama záření, rentgenového záření, ultrafialového záření, viditelného spektra, infračerveného záření, mikrovlnného záření a záření radiového. Světlo představuje pouze malou část elektromagnetického vlnění, které se nachází ve viditelných vlnových délkách. V rozsahu vlnových délek 380 - 400nm hovoříme o dolní mezi viditelnosti. Rozsah 760 - 780nm představuje horní mez viditelnosti. Z fyzikálního hlediska můžeme světlo někdy definovat jakožto vlnění a jindy jako proud částic. Říkáme proto, že světlo má duální charakter. Při difrakci (ohybu světla) připisujeme světlu vlnový charakter, zatímco při fotoelektrickém jevu definujeme světlo jakožto proud fotonů. Z čehož mimo jiné vyplývá, že čím je vlnová délka světla delší, tak tím více se světlo bude chovat jako vlnění. Stejně tak naopak, čím kratší vlnová délka, tím více se světlo chová jakožto proud částic. K vysvětlení světelných jevů se povětšinou využívá vlnové teorie. Světlo můžeme vidět, jestliže elektromagnetické vlnění jenž je vyzařováno ze světelného zdroje se dostane přímo do oka, eventuálně nepřímo po odrazu.

1.1 Undulační teorie

Undulační teorii, neboli vlnovou má na svědomí Holandský fyzik Christian Huygens roku 1678. Vycházel z předpokladu, že ve vzduchu se rozpíná tzv. etér, což je jemná látka prostupující všemi tělesy která existuje i ve vakuu. Světlo je touto teorií vysvětlováno, jako vlnění tohoto pružného světelného éteru. Z této představy podélného vlnění pomocí konstrukce vlnoploch odvodil přímočaré šíření světla a zákon odrazu a lomu světla, které platí nejen pro izotropní tělesa, ale třeba i pro islandský vápenec, který se vyznačoval dvojlomem, jenž se vysvětluje působením dvou vlnoploch, přičemž je jedna z koulí jako v izotropických tělesech, druhá rotačním elipsoidem.

1.2 Emanální teorie

Později přišel se svou teorií Issac Newton, korpuskulární (emanační) teorie světla, jak se daná teorie nazývá, vysvětluje světlo jako proud drobných hmotných částic - korpuskulí, vyletujících ze zdroje obrovskou rychlostí. Tato teorie však nevysvětluje vlnové vlastnosti těchto částic.

1.3 Interference světla

Interference světla potvrzuje vlnovou povahu světla a vzniká dvou či více světelných vlnění.

Zdrojem světelných vln jsou atomy svítících těles, jenž vysílají vlny různých frekvencí a po velmi krátkou dobu, interferenční obrazec se neustále mění (změna osvětlení není pozorovatelná), oko vnímá pouze jednu - střední - hodnotu osvětlení proto je interference pozorovatelná pouze tehdy, jestliže interferenční obrazec je stálý a to je právě tehdy, když skládaná světelná vlnění jsou vzájemně koherentní. Koherentní světelná vlnění, jsou ta která mají stejnou frekvenci a zároveň se vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru nemění v závislosti na čase. Za koherentní je možno považovat záření, procházející štěrbinami Z_1 a Z_2 za podmínky, že je jejich vzdálenost velmi malá.

1.4 Polarizace světla

Polarizace je vlastnost vlnění a to ať světelného, tak jiného elektromagnetického záření.

Skládá se ze dvou vektorových složek, vektor elektrické složky kolmý představuje kolmici na složku magnetického pole. Obě složky se mohou se otáčet kolem vektoru šíření.

2 Fotometrické veličiny

Jedná se o fyzikální veličiny, které charakterizují viditelné elektromagnetické záření (světlo) a kvantitativně popisují optický vjem světelného záření. Mezi tyto veličiny patří světelný tok, svítivost, osvětlenost a jas. Krom kvantitativních veličin, máme také spektrální veličiny, které hodnotí barevné (spektrální) vlastnosti osvětlení, těmito veličinami jsou teplota chromatičnosti a index podání barev. Chromatičnost a kolorita jsou psychofyzikální pojmy. Spektra různého spektrálního složení mohou vytvářet dojem stejné chromatičnosti, avšak budou vykazovat rozdíly v podání barev.

Teplota chromatičnosti světla světelného zdroje, se používá pro popis barevného tónu světla, v podstatě udává teplotu černého zářiče (v kelvinech K), při které zářič svítí světlem stejné chromatičnosti.

Dále máme veličiny směrové, které slouží k vyhodnocování směrových vlastností světla a schopnosti tvorby stínů. Směrovými veličinami jsou světelný vektor a činitel podání tvaru.

2.1 Veličiny a jednotky měření světla, spektrum

K vyjádření světla, které dopadá na plochu mohou být použity 3 druhy veličin a jednotek. Tyto veličiny se rozdělují na objektivní, tj. energetické a kvantové a na subjektivní, kde patří fotometrické veličiny, které se vztahují citlivosti lidského oka na světlo. Fotometrické veličiny v této práci nebudou používat, protože vnímání světla rostlin a lidského oka se značně liší. [3]

2.1.1 Energetická ozáření I_{en} , ($W\ m^{-2}$)

Energetická ozáření se používá k uvádění záření v infračervené či ultrafialové oblasti. Dávěji byla tato jednotka užívána k charakterizaci FAR. Energetická ozáření nám říká jaké množství energie, dopadá za 1s na plochu $1\ m^2$. Což můžeme vyjádřit jako plošný příkon ($W\ m^{-2}$). Stejně jednotky má hustota zářivého toku, která by šla definovat, jako tok energie za jednu sekundu jednotkovou plochou postavenou kolmo k paprsku. [3]

2.1.2 Kvantová ozáření I_{kv} , ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)

Tato jednotka představuje integrální ozáření v určitém spektrálním intervalu. Konkrétně pro rostliny se jedná o záření v intervalu 400 – 700 nm, které nazývané jako fotosynteticky aktivní záření FAR. V dnešní době existují přístroje měřící FAR rovnou v jednotkách $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, pod však takový přístroj k dispozici nemáme, musíme si pomoci přepočtem z $W\ m^{-2}$. Nutno ještě podotknout, že kvantová ozáření nám nic neříká o spektru záření. [3]

2.1.3 Spektrální energetická ozáření $I_{en}(\lambda)$

Jednotky jsou závislé na volbě osy x spektra. Nejčastěji se volí vlnová délka v nm. Pak jsou jednotky $W\ m^{-2}\ nm^{-1}$. Hovoří se také o energetickém spektru nebo o spektrální hustotě záření. [3]

2.1.4 Spektrální kvantová ozáření $I_{kv}(\lambda)$

Jednotky závisí na volbě osy x spektra. Nejčastěji se volí vlnová délka v nm. Pak jsou jednotky $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}\ nm^{-1}$. Chápe se tím kvantová ozáření připadající na jednotku vlnové délky (1 nm). Hovoří se také o kvantovém spektru. [3]

2.2 Fotometrické jednotky

2.2.1 Lux

je jednotka intenzity osvětlení. Jeden lux je definován jako osvětlení způsobené světelným tokem o jednom lumenu dopadající na plochu 1 m². [8]

2.2.2 Lumen

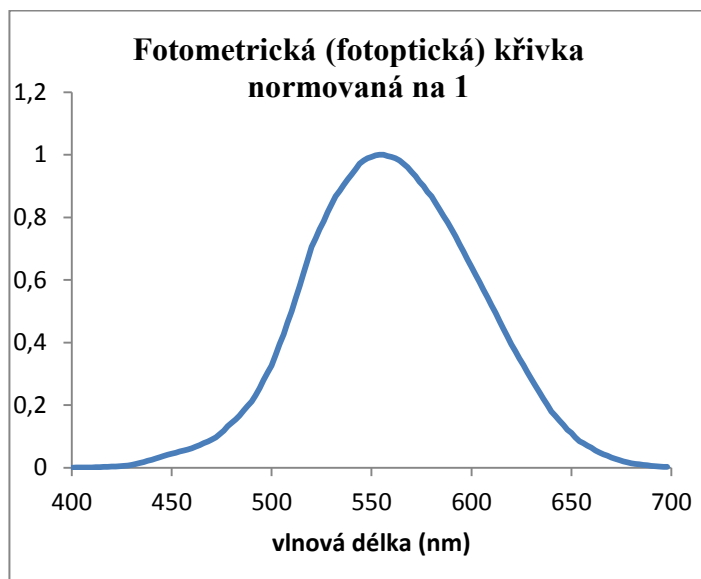
Lumen je jednotkou světelného toku, která je odvozená z jednotek SI soustavy. Jeho definice je následující: je to světelný tok, vyzařovaný do prostorového úhlu 1 steradiánu bodovým zdrojem, jehož svítivost ve všech směrech se rovná 1 kandela. [9]

2.2.3 Kandela

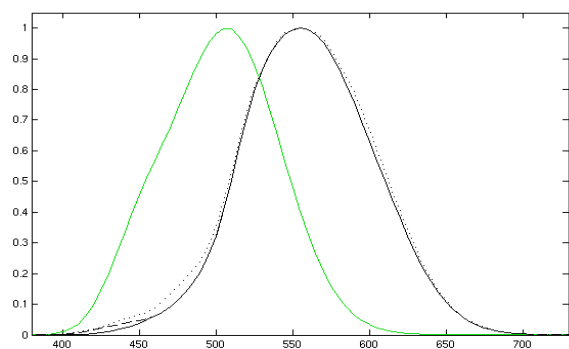
Zn. cd, je jednotka svítivosti. Patří mezi 7 základních jednotek soustavy SI. Tato jednotka je definována coby svítivost světelného zdroje, který v daném směru vysílá monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz (čili o vlnové délce ve vakuu 555 nm, což je vlnová délka, ke které je nejvíce citlivé lidské oko) a jehož zářivost (zářivá intenzita) v tomto směru činí 1/683 W · sr⁻¹ (wattů připadající na jeden steradián). [10]

2.3 Fotometrická křivka $f(\lambda)$

Fotometrická křivka pro fotoptické vidění (na světle) je definována jako mezinárodní standard. Je uvedena na obr. 1. Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) stanovila tyto křivky pro tzv. normálního fotometrického pozorovatele. Křivka pro skotoptické vidění (za šera) je posunuta ke kratším vlnovým délkám s maximem kolem 510 nm. [3]



Obr.1 Fotometrická křivka [3]



Obr.2 Porovnání fotoptické (černá) a skotoptické (zelená) standardní fotometrické křivky. [3]

3 Spektrum a barva světla

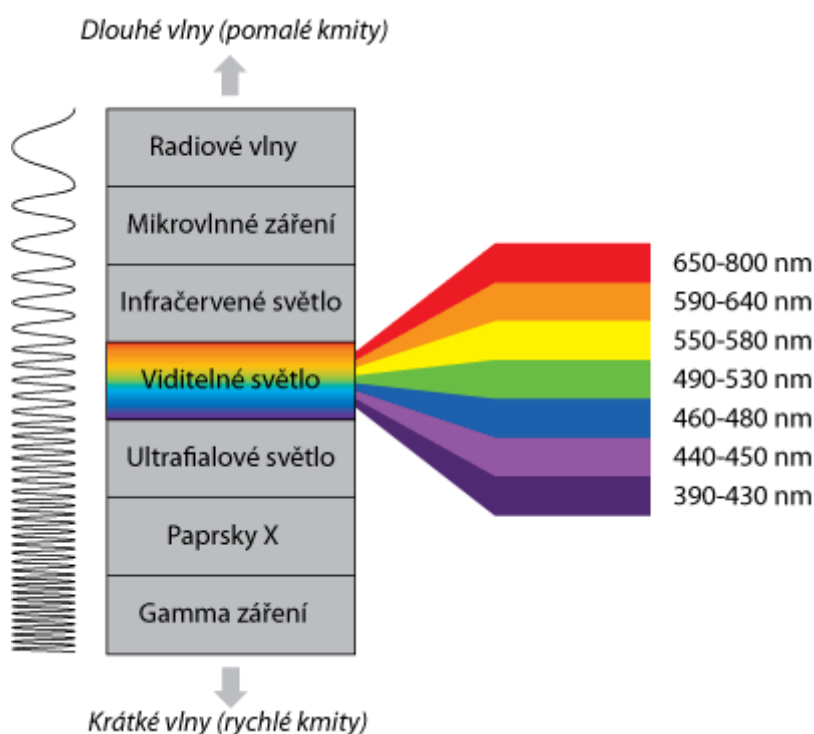
Viditelné záření v rozsahu cca 390-790 nanometrů se označuje jako světlo, při různých vlnových délkách ho vnímáme jako světlo různé barvy. Spektrum světelného záření obsahuje tzv. spektrální barvy: červená, žlutá, oranžová, zelená, modrozelená - azurová, modrá, fialová. Při prolnutí krajních barev viditelného spektra získáme barvy nespektrální, to jsou např. purpurová nebo růžová. Viz obrázek:



Obr.3 Kruh barevného spektra [11]

3.1 Chromatičnost a Kolorita, teplota chromatičnosti

Chromatičnost a kolorita jsou se pojmy tzv. psychofyzikální, spektra o různém spektrálním složení mohou budít dojem stejné chromatičnosti, ačkoliv budou výrazné rozdíly v podání barev. Hledat souvislost mezi podáním barev a chromatičností světla je bezpředmětné, protože žádná není. Z teploty chromatičnosti světla světelného zdroje lze zjistit teplotu černého zářiče, při které svítí zářič světlem stejné chromatičnosti. Barevné vlastnosti předmětů označujeme pojmem kolorita, zatímco pro barevné vlastnosti světla používáme výraz chromatičnost. Chromatičnost je dána spektrálním složením, jenž vysílá primární zdroj. K vyjádření složení světelného spektra, můžeme použít teplotu chromatičnosti nebo souřadnice v kolorimetrické soustavě CIE, tzv. kolorimetrický trojúhelník CIE. Eventuálně můžeme toto vyjádření provést poměrným spektrálním složením světla. Zdroje jenž mají svůj chromatický bod v kolorimetrickém trojúhelníku CIE v blízkosti teplotní křivky, jsou charakterizovány náhradní teplotou chromatičnosti. S narůstající teplotou dochází ke změně spektrálního složení světla černého tělesa. [1], [2], [4]



Obr.4 Vlnové délky jednotlivých složek viditelného spektra [12]

Podle tvaru světelného spektra dělíme:

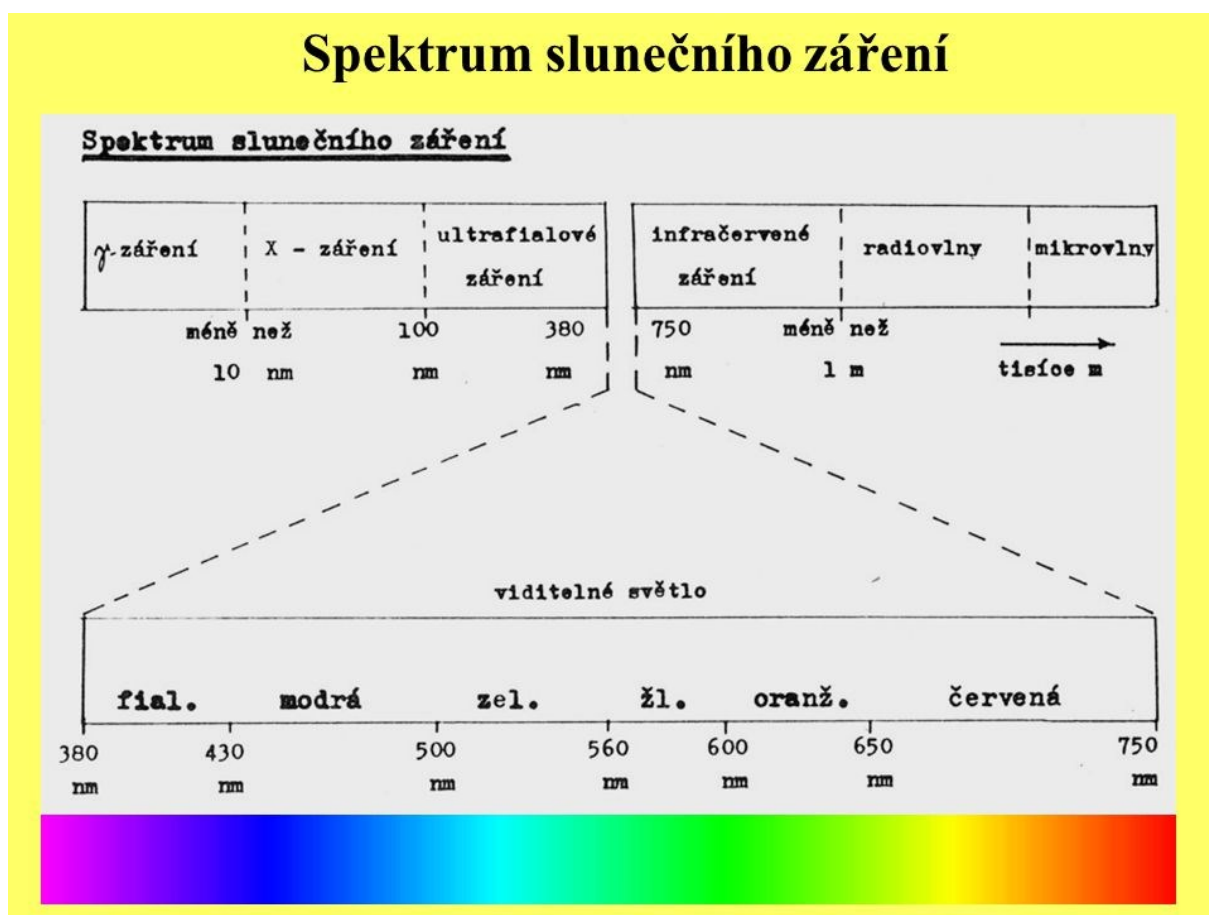
1. Světelné zdroje se spojitým spektrem– do této kategorie spadají světelné zdroje přírodní, jako například hlavní světelný zdroj na zemi slunce, tak i umělé zdroje světelného záření. Mají spojité barevné spektrum záření, což znamená, že jednotlivá pásma spektra se prolínají v souvislý barevný pruh. Čára spektrální zářivosti je plynulá.
2. Světelné zdroje s nespojitým spektrem, nebo-li čárovým spektrem – jednotlivá barevná pásma se neprolínají. Nespojitá světelná spektra mají LED světelné zdroje popřípadě výbojky.
3. Světelné zdroje s monochromatickým světlem –, tyto světelné zdroje vyzařují pouze jednobarevné světlo a jejich spektrum se skládá z jedné čáry, eventuálně dvou čar těsně blízko sebe. Do této kategorie spadají lasery a nízkotlaké sodíkové výbojky.

3.2 Sluneční záření

Primárním zdrojem světla je slunce. Ve své podstatě, můžeme slunce popsat jako velkou plynovou kouli, rozžhavenou na vysokou teplotu (teplota povrchu slunce činí cca 6000 Celsia),

zásluhou termionukleárních reakcí, jenž probíhají v slunečním jádře. Z tohoto důvodu vyzařuje do vesmíru velké množství energie světelné a tepelné.

Spektrum slunečního záření je složeno z vlnových délek cca od 100 nm do 1 mm. Do tohoto spektra spadá UV záření (pod 400 nm), viditelné světlo (400 – 750 nm) a infračervené záření (nad 750 nm). Velikost toku záření, které dopadá na metr čtvereční plochy zemského povrchu se vyjadřuje tzv. sluneční konstantou. Hodnota sluneční konstanty je $1,37 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Sluneční konstanta ovšem nepočítá s vlivem zemské atmosféry. Která výrazně přispívá k pohlcování ultrafialového záření prostřednictvím ozónové vrstvy a celkově snižuje sluneční radiaci. Intenzita slunečního záření vychází ze stavu atmosféry, zeměpisné šířky a délky, ročního období, sklonu zemské osy ke slunci. Nejdůležitější je šířka atmosféry. Pohlcování záření je přímo úměrné tloušťce vrstvy atmosféry. Proto byl odvozen faktor AM (Air Mass factor), udávající násobek optické šířky atmosféry. Většinou se při výpočtech používá $AM = 1,5$ které odpovídá úhlu dopadu slunečního záření $41,75^\circ$. [20], [21]



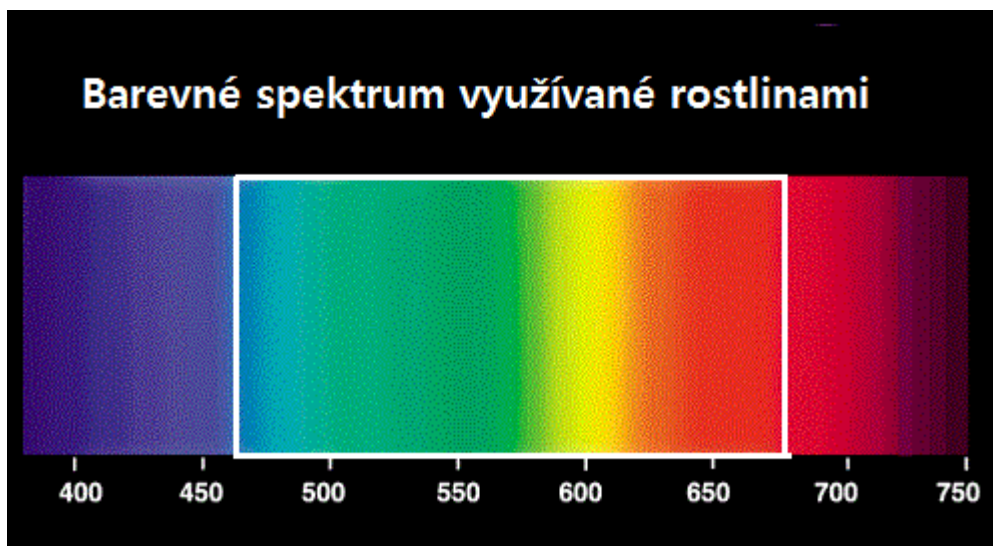
Obr.5 Spektrum slunečního záření [13]

3.3 Monochromatické záření

Monochromatické záření je elektromagnetické záření, které má jen jednu barvu. Protože spektrum monochromatického záření obsahuje pouze jednu frekvenci nebo úzký pás frekvencí. Většinou jsou zdroji monochromatického záření lasery, popřípadě můžeme monochromatické záření získat filtrováním bílého světla pomocí mřížkového nebo hranolového monochromátoru. [19]

4 ROSTLINA A ZÁŘENÍ

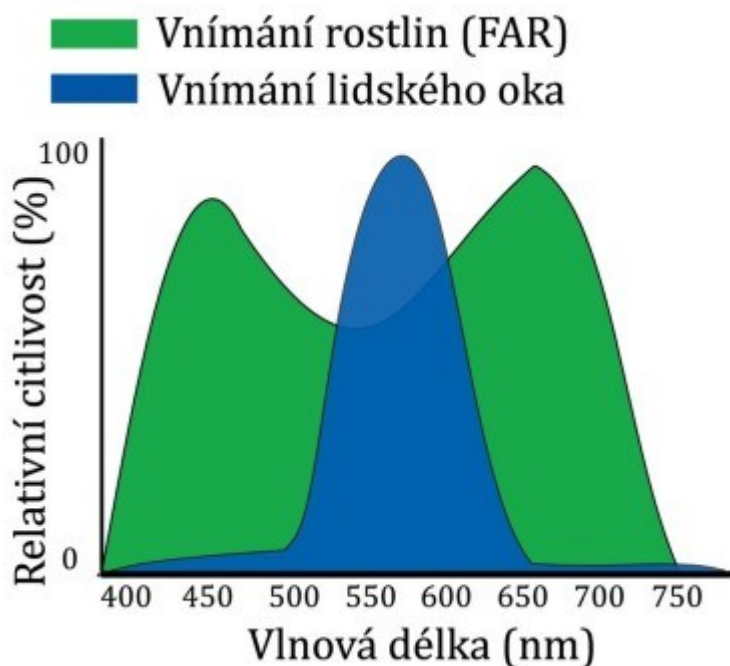
Jednotlivá barevná spektra, působí na určitá stádia vývoje rostlin. Modré světlo působí na průduchy (regulace vody) a má příznivý vliv na růst semen. Spektrum červené a oranžové podporuje produkci hormonů, které v rostlinách spouští rašení a růst květů.



Obr.6 Barevné spektrum využívané rostlinami [14]

Rostliny potřebují především fotosynteticky aktivní záření, jenž využívají při fotosyntéze, při fotosyntéze je však využito cca jen 2% – 10% viditelné části spektra. Největší část záření je rostlinami pohlcena. Většina pohlcené energie je přeměněna na teplo. Odraz světla (reflexe) závisí na povrchu listů, hladké a lesklé listy odrážejí světlo více než listy matné. Průchod záření (transmise) se odvíjí především od tloušťky listů. Čím jsou listy tenčí, tím větší je jejich průchodnost, max. však 40%. Při umělém osvětlení se snažíme simulovat podmínky, jaké mají rostliny v přírodě. Můžeme mít osvětlení pouze umělé tzv. kultivační, které používáme v růstových komorách, popřípadě asimilační, které slouží jako doplněk k prodloužení denního osvětlení.

Rostliny získávají světelnou energii prostřednictvím světelných kvant, fotonů. Fotony jsou pohlcovány primárně chlorofylem, ale z části i jinými pigmenty. Každý foton vždy uvolní jeden energeticky bohatý elektron, který vstupuje do vlastních biochemických procesů. Tyto procesy mohou být anabolické (z jednoduchých látek vznikají složitější látky), tzn. spojené s výstavbou látek (fotosyntéza), nebo katabolické. Katabolické procesy souvisí s odbouráváním a rozkladem látek (za složitých látek vznikají jednoduché), čímž se získá energie.



Obr.7 FAR vs. Vnímání lidského oka [15]

4.1 Fotosyntéza

Fotosyntéza je fotochemický proces probíhající v zelených částech rostlin, převážně v listech. Je to proces při kterém se přijatá světelná energie záření, např. sluneční světlo nebo klidně světlo z umělého osvětlení, jimž je rostlina osvětlována mění na energii chemických vazeb ATP (adenosintrifosfátu), jednoduché anorganické látky se díky této chemické reakci přemění na sacharidy což jsou organické sloučeniny, které potřebuje rostlina k tomu aby mohla růst. Průběh fotosyntézy se odehrává ve chloroplastech, chloroplasty nalezneme v buňkách rostliny. Jaký je průběh fotosyntézy? K 6 molekulám CO_2 a 6 molekulám vody, přidáme energii a následně díky složité kaskádě reakcí dojde k přeměně na glukózu a 6 molekul kyslíku, což vyjadřuje uvedená rovnice fotosyntézy.

Chemická rovnice fotosyntézy:



Pro zahájení fotosyntézy je potřeba:

- zdroj světelné energie
- oxid uhličitý
- voda

4.1.1 Foto autotrofní organismy

Pojem autotrofní organismy označuje organismy se schopností fotosyntézy. Do této kategorie spadají organismy eukaryotní - vyšší rostliny, zelené a hnědé řasy avšak i prokaryotní organismy, mezi které patří jednobuněčné sinice a zelené i purpurové bakterie. [6]

4.1.2 Heterotrofní organismy

Zbývající biotické složky v ekosystému. Tyto organismy využívají energie organické látky vytvořené rostlinami. U vyšších rostlin se fotosyntéza primárně váže na mezofylové buňky v listech. Fotosyntéza probíhá v chloroplastech a to ve dvou fázích, fázi světelné a temnotní. V temnotní fázi fotosyntézy probíhá tzv. Calvinův cyklus, což je metabolická dráha fixace a redukce oxidu uhličitého probíhající za vzniku sacharidů. P_n - Rychlost fotosyntézy je charakterizovaná jako intenzita nárůstu zelené hmoty rostlin a vyjadřuje se jako schopnost vstřebávání molekul CO_2 na jednotku plochy listu za sekundu. [6]

Faktory pro správný růst rostlin

- světlo
- CO_2 ,
- teplota a eventuálně vlhkost vzduchu,
- teplota půdy,
- obsah vody v půdě,
- živiny

Důležitost těchto jednotlivých faktorů, je prakticky stejně důležitá. Optimalizace jednotlivých faktorů je však limitována denním světlem. Proto je výhodné použití asimilačních osvětlovacích soustav, jakožto doplňkové osvětlení, podporuje růst rostlin a tudíž optimalizaci limitujících faktorů. [5], [6]

5 Vyjádření FAR

K vyjádření fotosyntetický aktivního záření používáme energetické či fotonové (kvantové) jednotky.

Energetickou jednotkou toku FAR je watt (WFAR), intenzita ozáření pak má jednotku $\text{WFAR} \cdot \text{m}^{-2}$. Intenzitu ozáření ve FAR spektru můžeme vypočítat ze spektrální intenzity ozáření I_e [5]

A to prostřednictvím vztahu:

$$E_{\text{FAR}} = \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} e_{\lambda} d\lambda \quad (\text{W}_{\text{FAR}} \cdot \text{m}^{-2}, \text{W} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m})$$

Kde:

E_{FAR} - Intenzita ozáření ve FAR spektru

e_{λ} - spektrální intenzita ozáření

Další veličinou posuzující FAR v energetických jednotkách je dávka ozáření. Podle hodnoty dávky ozáření zjistíme, jaké FAR ve wattech dopadne na osvětlovanou plochu za daný časový úsek. Dávku ozáření lze tedy vyjádřit jednotkou $\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$ FAR. Hlavními fotonovými veličinami jsou fotonový tok s jednotkou $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ a intenzita fotonového toku (pro potřeby rostlin ve spektru od 400 do 700 nm) s jednotkou $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

WFAR je energetická jednotka toku FAR. Intenzita ozáření, kterou je možno vypočítat ze spektrální intenzity ozáření I_e a to podle vzorce:

$$E_{\text{mol}} = \frac{1}{119,4} \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} e_{\lambda} d\lambda \quad (\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m}, \text{m})$$

Hodnoty obou intenzit nejsou vůči sobě v konstantním poměru, protože jsou na spektru záření závislé jiným způsobem [5]. Vzhledem k tomu že, že světelné zdroje disponují rozdílnými spektry emitovaného záření, tak poměr mezi energetickými a kvantovými jednotkami se nachází v intervalu:

$$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 0,2 - 0,24 \text{W}_{\text{FAR}} \cdot \text{M}^{-2}$$

Abychom byli schopni navrhnout osvětlovací soustavu pro osvětlování rostlin, neobejdeme se znalostí intenzity ozáření z kvantového i energetického pohledu.

5.1 Měření FAR

Fotosyntetický aktivní záření hodnotíme podle prospěšnosti vzhledem k potřebám rostlin. Intenzitu FAR je možno měřit μmol metrem, který měří počet částic světla v intervalu vlnových délek 400 – 700 nm. [6] V tomto případě je nám naměřena intenzita FAR udávaná v $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Ovšem měření FAR můžeme provádět také luxmetrem. Poté však musíme provést přepočet na $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

5.2 Osvětlení vhodné pro růst rostlin

Rostliny disponují spektrální citlivostí, jenž se v průběhu denního cyklu může výrazně měnit. Z toho vyplývají zvláštní požadavky na spektrum a intenzitu záření, přičemž důležitý je také úhel dopadu záření. Jednotlivé druhy rostlin, mají různé požadavky na světelné spektrum, také záleží na fázi vývoje, v níž se rostlina nachází. Pro rychlost fotosyntézy je nejvíce důležitá intenzita v červené a modré oblasti spektra FAR. Rostliny potřebují během dne přijmout určité množství záření, vyzářené v různých časových úsecích. To z důvodu střídání anabolických a katabolických procesů. Rostliny se dle požadavků na osvětlení dělí na:

Rostliny s vysokými požadavky, potřebují ozáření více než $150 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ neboli $75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Rostliny se středními požadavky, potřebují ozáření $40\text{--}50 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ neboli $20\text{--}25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Rostliny s nízkými požadavky, potřebují ozáření méně než $40 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ neboli zhruba $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Důležitý je také vhodný úhel dopadu záření na rostliny, protože díky povrchovým vlastnostem většiny rostlin dochází k odrazu části dopadajícího záření. Při kolmém dopadu záření na rostlinu dochází k maximální absorpci. Jestliže zvyšujeme úhel od kolmice dopadajícího záření, dochází ke snížení absorpce.

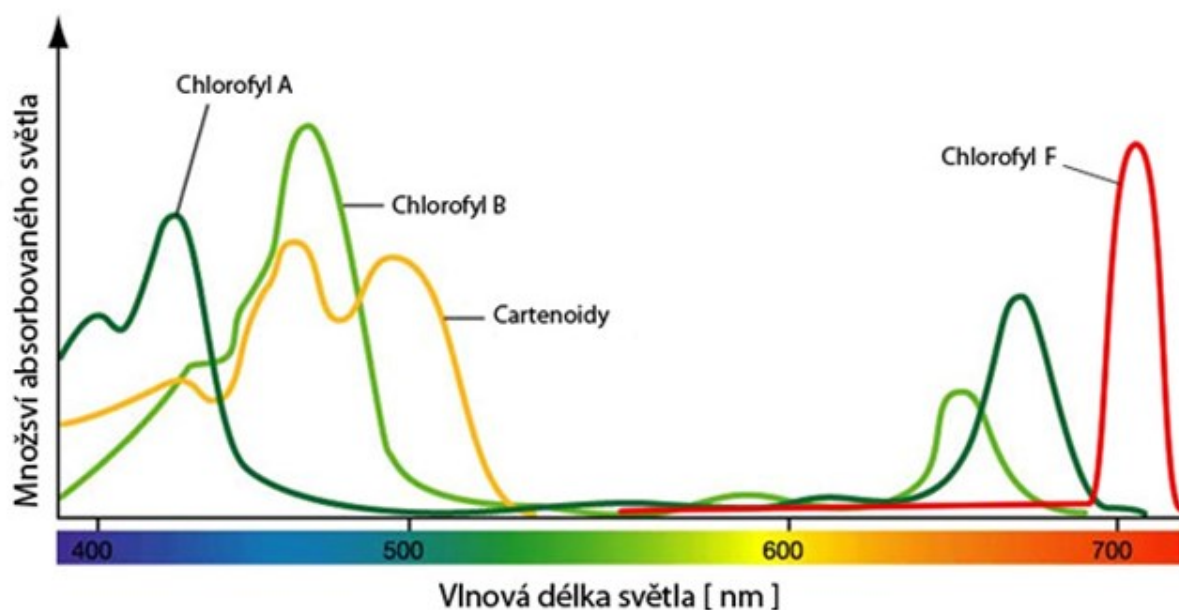
Úroveň osvětlení	FAR Wattů/m ²	Vhodné pro
Nízká	2 – 25	Doplňkové osvětlení pro skleníkové rostliny.
Střední	26 – 60	Dostatečné pro indoor pěstování okrasných rostlin a šlechtění.
Vysoká	60 – 100	Vynikající pro indoor. Čím vyšší hodnota, tím lepší.
Velmi vysoká	101 – 135	Extrémně teplomilné rostliny v uzavřených prostorách.

Obr.8 Úrovně osvětlení [16]

6 Světelné zdroje

6.1 LED

Vzhledem k nevyhovujícím parametrům vysokotlakých sodíkových výbojek, které jsou v dnešní době hojně využívány, byly vyvinuty pěstební LED svítidla jenž jsou založena na spektru vlnových délek stimulujících fotosyntetické procesy. Vlnové délky vyzařované těmito svítidly, rostliny využijí s maximální efektivností. Dané vlnové délky se především objevují v oblasti elektromagnetického záření 340nm-850nm. Provozní teplota těchto zářičů je velmi nízká a sice pod 50°C.



Obr.9 Spektrum vlnových délek [17]

6.1.1 Princip funkce LED

Průchodem elektrického proudu PN přechodem v propustném směru, dochází k emisi nekoherentního světla s úzkým spektrem. PN přechod se skládá ze dvou typů polovodičů, elektrická vodivost závisí na jejich chemickém složení (obsahu příměsí zvyšujících elektrickou vodivost). Dle typu příměsí dělíme na polovodiče typu P a typu N. Při umístění těchto polovodičů vedle sebe, vznikne PN přechod. LED disponují pásmy vyzařování od ultrafialových, přes barvy viditelného spektra, až po pásmo infračervené. Pásmo světelného spektra diody je závislé na chemickém složení polovodiče. Už z principu funkce LED není možno emitovat přímo bílé světlo. Proto novější bílé LED využívají luminofor. Staré bílé diody, dosahovaly efektu bílého světla aditivním míšením. Mnohé LED emitující modré světlo, část tohoto modrého světla pomocí luminoforu přetransformují na světlo žluté, přičemž míšením vzniká světlo bílé. Případně existují typy LED, které emitují ultrafialové záření, které díky luminoforu přemění přímo na bílé světlo. Čím více se zkracuje vlnová délka emitovaného světla, tím víc se zvětšuje napětí v propustném směru.

6.1.2 Bílé LED

Bílé LED vysílají vlnové délky v celé šíři spektra viditelného záření. Z důvodu že LED emitující světlo, obsahují jen malý interval vlnových délek, není možno emitovat přímo bílé světlo. Bílé světlo se vytváří přes RGB systém, nebo Konverzí vlnových délek pomocí luminoforu. []

6.1.2.1 RGB

Bílé světlo vytváříme složením červeného, modrého a zeleného světla pomocí RGB modulů. RGB diody existují se čtyřmi nebo šesti vývody. Diody se čtyřmi vývody mají společné anody, nebo společné katody.

6.1.2.2 Luminifor

Luminofor je látka měnící vlnovou délku vyzařovaného světla. Bílé LED bývají často realizovány prostřednictvím modré diody a žlutého luminoforu. Tato kombinace vytváří optický efekt bílého světla.

Světlo bílých LED může být chladně bílé, pokud náhradní teplota chromatičnosti bude v rozmezí od 5000 K do 10 000 K, popřípadě neutrálně bílé jestliže náhradní teplota chromatičnosti je od 3700 K do 5000 K nebo teplé bílé čili s náhradní teplotou chromatičnosti od 2600 K do 3700 K.

5000 K nebo teplé bílé čili s náhradní teplotou chromatičnosti od 2600 K do 3700 K.

5000 K nebo teplé bílé čili s náhradní teplotou chromatičnosti od 2600 K do 3700 K.

6.1.3 Výhody LED žárovek

Je absence infračerveného a ultrafialového záření, barva jejich světla je v barevném spektru velmi blízko barvě denního světla, takže je velmi přirozené. Další výhodou je, že ihned po počátečním průtoku elektrické energie svítí plným jasnem. Což se o klasických zářivkách říci nedá, v jejich případě musí dojít k ustálení výboje na pracovní teplotě.

6.1.4 Parametry LED

Dělíme na parametry elektrické, což jsou: jmenovité napětí, proud diodou jmenovitý příkon, a parametry světelné, jako například celkový světelný tok, index podání barev, teplota chromatičnosti atd

6.1.4.1 Elektrické parametry

Výkonové LED, jenž jsou využívány k osvětlování rostlin, mají jmenovitý proud v rozmezí 1-3 A. Jmenovité napětí je závislé na barvě emitovaného záření. Hodnoty jmenovitého napětí se pohybují okolo 2-3V, u bílých a modrých diod může být jmenovité napětí i o trochu vyšší.

Pokud jde o jmenovitý příkon, tak ten se pohybuje v rozmezí jednotek wattů, v případě výkonových LED okolo 10W. Sestavíme-li diody do bloku, získáme světelný zdroj, který má výrazně vyšší příkon.

6.1.4.2 *Dosahované parametry LED*

Ačkoliv je na trhu velký výběr výkonových diod, tak háček je v tom, že převážná většina se orientuje na osvětlení prostřednictvím bílých LED. Bohužel bílé LED emitují pro potřeby rostlin malé množství FAR záření v červené a modré oblasti spektra, které jsou podstatné pro rašení a růst. Z toho vyplývá, že ve svítidlech používaných ve sklenících a k osvětlování rostlin obecně, potřebujeme krom bílých LED, také LED emitující červené a modré světlo, na které jsou rostliny nejvíce citlivé. Pokud jde o diody spadající do těchto oblastí spektra záření, tak tady už není výběr zdaleka tak velký, přičemž dosahované parametry u jednotlivých výrobců jsou skoro stejné. Pro docílení spektrálního složení světla, které bude maximálně podporovat potřeby rostlin, vycházející z jejich spektrální citlivosti, bude nejvhodnější použití teplých bílých LED pro zastoupení celého viditelného spektra, v kombinaci modrými a červenými LED, jenž spadají do těch částí spektra, které jsou velmi podstatné pro fotosyntézu.

6.2 Jiné světelné zdroje k osvětlování rostlin

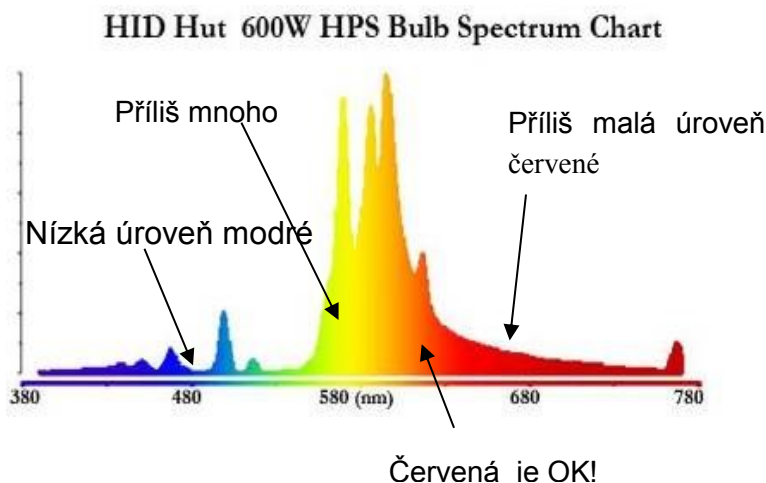
V této kapitole si řekneme něco málo o dalších dvou typech světelných zdrojů používaných k osvětlování rostlin. A sice o vysokotlakých sodíkových výbojkách, které ačkoliv jsou často používány pro osvětlování rostlin, tak jejich spektrum zrovna ideálně nepokrývá potřeby kladené spektrální citlivosti rostlin. Dále pak o výbojkách Halogenidových, které si z hlediska barevného spektra vedou lépe, což však vyvažuje např. jejich kratší životnost.

6.2.1 Vysokotlaké sodíkové výbojky

Pro osvětlování rostlin ve sklenících, jsou často používány vysokotlaké sodíkové výbojky o výkonu 600W. Které ovšem mají výrazné nevýhody, jedna z hlavních je že jejich barevné spektrum moc nevyhovuje podmínkám spektrální citlivosti rostlin pro optimální růst. A to především z důvodu, že jejich barevné spektrum obsahuje velké množství žluté barvy, málo barvy modré a červené, které jsou podstatné pro podporu rašení a růstu rostlin.

Princip funkce vysokotlaké sodíkové výbojky by šel popsat následovně, vysokotlaké sodíkové výbojky vyzařují světlo prostřednictvím sodíkových par o provozním parciálním tlaku v rozpětí 3 - 60 kPa. Jejich světelný výkon je větší než 100 lm / W.

S rostoucím tlakem par sodíku, dochází k velkému zlepšení v podání barev. Což ovšem vyvažuje nižší měrný výkon, jenž dosahuje minima pod 100 Pa a poté znovu narůstá.



Obr.10 Spektrální charakteristika vysokotlaké 600W výbojky [18]

6.2.2 Halogenidové výbojky

Pokud by nám šlo pouze o růst rostlin, bude nejlepší používat halogenidové výbojky, pro kvetení jsou pak vhodnější výbojky sodíkové. Halogenidové výbojky emitují více světla zasahujícího do modrého spektra, modré světlo rostliny potřebují k tvorbě zelené hmoty. Takže rostliny rostoucí pod halogenidovými výbojkami mají díky jejich světelnému spektru silnější stonky a listy, nevýhodou ale je že rostou pomaleji. Rostliny pěstované pod sodíkovou výbojkou, rostou rychleji ale stonky a listy mají slabší.

6.2.2.1 *Princip funkce*

Jsou to vysokotlaké výbojky, generující světlo pomocí výboje v parách rtuti eventuálně vzácných plynů, jestliže že se jedná o výbojky bez rtuti. Ovšem primárně v produktech štěpení halogenidů. Princip funkce halogenidové výbojky je odvozen od vysokotlaké rtuťové výbojky. Do hořáku jsou přidány další prvky ve formě halogenidů, jenž jsou prospěšné k vylepšení spektra vyzařovaného světla. Podle toho jak jsou kombinovány dané sloučeniny, je možno obrovské množství všemožných světelných spekter vhodné pro různé aplikace. Aplikace potřebných chemických prvků ve formě halogenidů je opodstatněna nutností dosáhnout lepších vlastností těchto látek pro výboj.

Materiálem pro hořáky halogenidových výbojek je křemenné sklo, popřípadě keramika. K zapálení výboje dochází skrz napěťový impuls o amplitudě 1,8 až 5 kV v závislosti na příkonu výbojky a náplni hořáku.

Než dojde k tepelnému ustálení, probíhá výboj v parách rtuti nebo v xenonu. Vlivem vysoké teploty se halogenidy štěpí na halogeny a svítící prvky. Když se atomy přiblíží ke stěně hořáku, kde je teplota nižší, dojde opět k slučování na halogenidy.

6.2.2.2 *Halogenidové výbojky s křemenným hořákem*

Jak už nadpis napovídá, materiálem pro výrobu hořáku těchto výbojek je křemenné sklo. Hořák se plní rtutí a halogenidy + některým z inertních plynů: neonem, argonem nebo xenonem. Tlak rtuťových par je zhruba 0,5 MPa a tlak příměsí 1,33.102 Pa. Hořák se nachází v baňce, jenž je naplněna inertním plynem popřípadě vyčerpaná z důvodu teplotní stabilizace. Výhodou halogenidových výbojek s křemenným hořákem, jsou především velké možnosti úpravy spektrálního složení vyzařovaného světla. Dále velmi dobré podání barev při velkém měrném výkonu výbojek. Doba životnosti halogenidových výbojek je až 15 000 hodin. [2], [7]

Halogenidové výbojky s křemenným hořákem se vyrábějí ve výkonové řadě od 35W do 2000 W. Index barevného podání může být až $R_a=90$ a měrný výkon 130 lm.W-1. Aby mohly halogenidové výbojky bez problému pracovat, potřebují venkovní teplotu v rozmezí od -20 do 60 °C. [7]

6.2.2.3 Halogenidové výbojky s keramickým hořákem

Keramický hořák je vysoce tepelně odolný, z čehož vyplývají značné výhody.

Díky tomu že byly vyvinuty halogenidové výbojky, u kterých je možno používat halogenidy kovů v kombinaci s keramickým hořákem, začala být možná výroba halogenidových výbojek o nízkých příkonech (do 15 W). Příkony vyráběných výbojek s keramickým hořákem se pohybují v rozmezí 15-400 W, měrný výkon 85-95 lm.W-1 a jejich index podání barev je i $R_a > 90$. [2], [7]

Tab. 1. Technické parametry výbojek vhodných pro doplňkové osvětlování ve sklenících

Výbojka	Napětí (V)	Příkon (W)	Světelný tok (klm)	Zářivý tok FAR (W)	Zářivý tok FPR (W)	Podání barev R_a	Přepočet
SON-T PIA Agro	230	400	55	134	18 ¹⁾	25	1 klx = 2,43 W/m ² FAR 1 W/m ² FAR = 0,412 klx
SON-T Comfort Pro	230	400	37	103	105 ²⁾	60	1 klx = 2,77 W/m ² FAR 1 W/m ² FAR = 0,361 klx
Powerstar HQ-T 1000/D	230	1 000	85	329	159 ²⁾	85	1 klx = 3,88 W/m ² FAR 1 W/m ² FAR = 0,258 klx
Master HMN-LA 1000W/956	230	1 000	90	293	146 ²⁾	90	1 klx = 3,25 W/m ² FAR 1 W/m ² FAR = 0,307 klx
Sluneční záření							1 klx = 4,72 W/m ² FAR 1 W/m ² FAR = 0,210 klx

¹⁾ jen RED, ²⁾ RED i FAR RED

Obr.11 Technické parametry výbojek vhodných pro doplňkové osvětlování ve sklenících [19]

7 Návrh soustavy zářičů pro skleník

Návrh soustavy zářičů je proveden v návrhovém programu Relux. Pro ověření jsem si vybrala svítidlo LED, které má níže uvedené parametry, má rotačně symetrickou charakteristiku, podání barev 80, přičemž teplota chromatičnosti je 850 čili 5000K. Vyzařovací charakteristika se blíží kosínové charakteristice. Což vychází z potřeb osvětlení skleníku, kde chci aby primárně svítidlo svítilo dolů, avšak chci i ať svítí do stran na listy aby bylo celé tělo rostliny prosvětleno.

Bude mě zajímat především hodnotící plocha (podlaha) a osvětlenost na podlaze. Použila jsem LED s 4000K a přepočet mi vyjde z měření pro bílou LED. Z měření spektrálních charakteristik určím, jakou chci osvětlenost. Pro LED 4000K, potřebuji ve skleníku 500lx pro přepočet, takže jsem navrhla pro svítidlo které jsem vybrala navrhla skleník 500lx.

Následující hodnoty vycházejí z přesných výpočtů kalibrovaných světelných zdrojů, svítidel a jejich rozmístění. V praxi se mohou projevit určité odchylky.

7.1 Údaje o svítidle

Účinnost svítidla : 70.7%

Účinnost svítidel : 142.53 lm/W

Výkon : 30 W

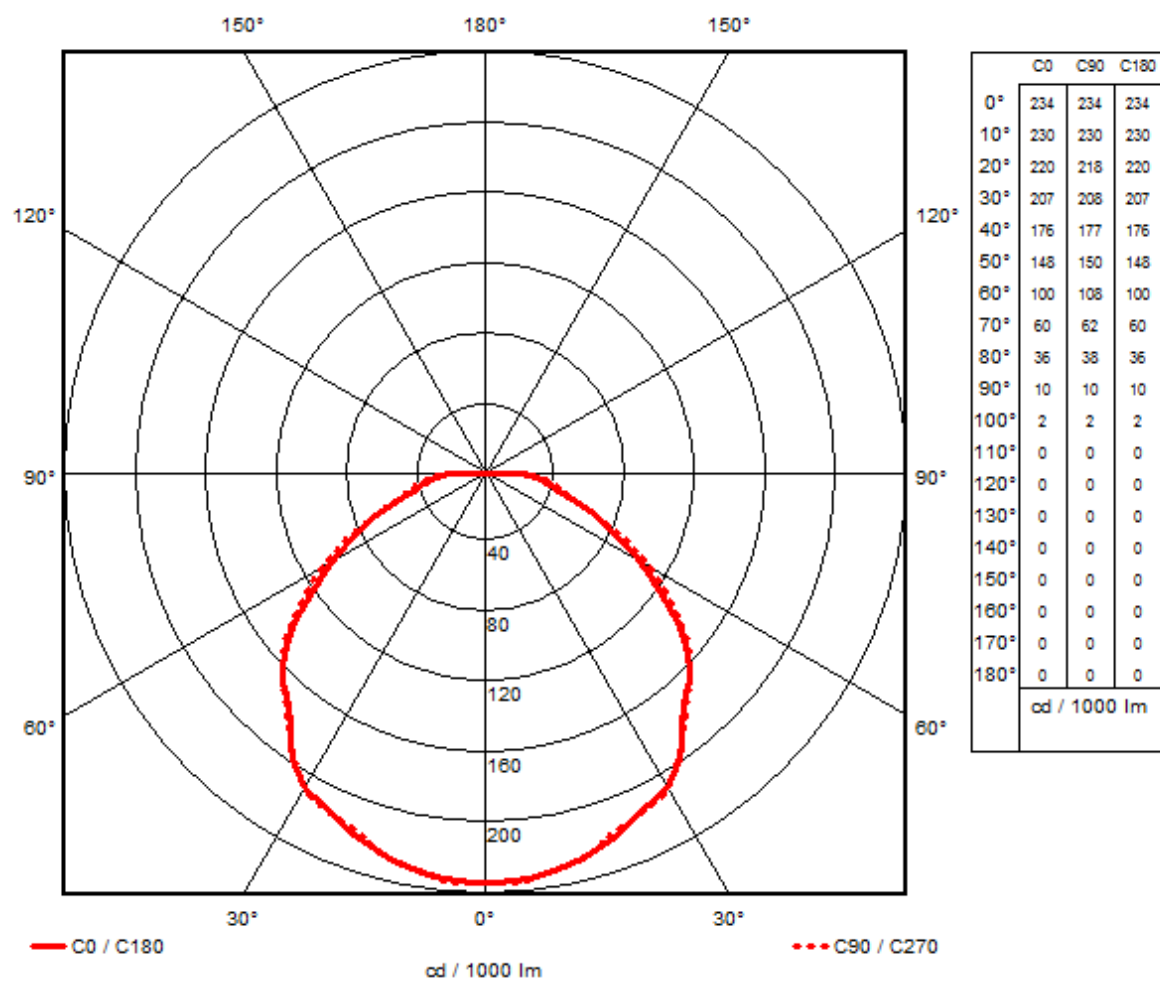
Světelný tok : 4275.9 lm

Rozměry : 1500 mm x 28 mm x 10 mm

Barva : 5000

Světelný tok : 3024 lm

Podání barev : 80



Obr.12 křivka svítivosti

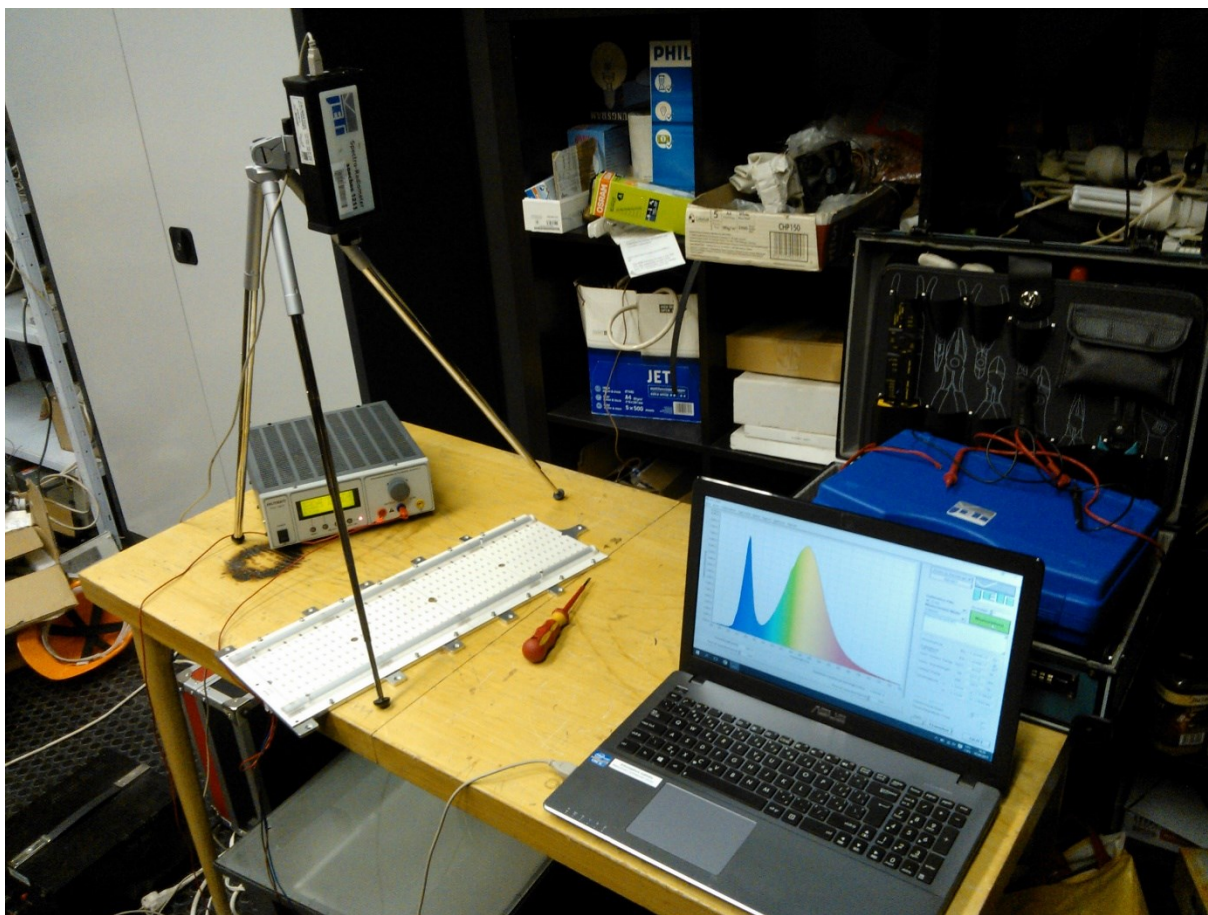
8 Měření fotosynteticky aktivního záření

V této kapitole se pokusím o shrnutí série měření na prototypovém svítidle. Měření bylo realizováno prostřednictvím spektrometru JETI. Měřila jsem pro každé barevné spektrum 8-10x a sledovala jak se v závislosti na měnícím se napětí mění vlnová délka. Software spektrometru, mi pro každé měření vyhodnotil graf závislosti záření na vlnové délce, tzv. spektrální charakteristiku. Pro každé barevné spektrum v této kapitole uvádím tabulku naměřených hodnot a pro srovnání spektrální charakteristiku prvního a posledního měření, spektrální charakteristiky ostatních měření jsou obsaženy v příloze k této bakalářské práci.

Měření jsem provedla abych byla schopná posoudit radiometrické, světelné a biologicky aktivní jednotky a abych věděla jak jsou v relaci.

Postup měření byl následující:

Nastavila jsem si spektrometr, poté zapojila svítidlo na zelené LED, postupně provedla 8měření, kdy jsem měnila vstupní napětí a zapisovala si jak se mění s napětím proud a vlnová délka, u každého měření jsem si udělala screen spektrální charakteristiky ze softwaru spektrometru. Stejný postup jsem opakovala i pro modré a bílé LED.



Obr.13 Foto měřícího stanoviště

Podmínky, při nichž jsem měřila, jsou přeneseny do spektrální charakteristiky, kde spektrum vyzáří určitou hodnotu ve wattech na metr čtvereční. Tudíž každý bod můžu popsat vyzářeným spektrem ve wattech na metr čtvereční, což pomocí přepočtů mohu vyjádřit v $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Vzhledem k tomu že použitý spektrometr JETI nabízí pouze měření v energetických jednotkách, které ovšem nejsou dobrým identifikátorem pro růst rostlin, bylo třeba provést přepočet na jednotku intenzity fotosynteticky aktivního záření (FAR), kterou je již zmíněné $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Pro názornou ukázkou, jsem zde provedla přepočet pro první měření spektra zelených LED diod a stejně tak pro první měření spektra bílých a modrých LED. K přepočtu jsem použila program Excel, který mi krom výpočtu FAR vykreslil křivku dané spektrální charakteristiky.

Při výpočtu FAR jsem zadávala hodnoty radiometrického výkonu, příslušící vlnovým délkám daného spektra, u zelených LED mi vychází integrační konstanta $2,19 \cdot 10^{-15} \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, u bílých LED pak $4,04 \cdot 10^{-14} \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, modré LED mají $3,80 \cdot 10^{-14} \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

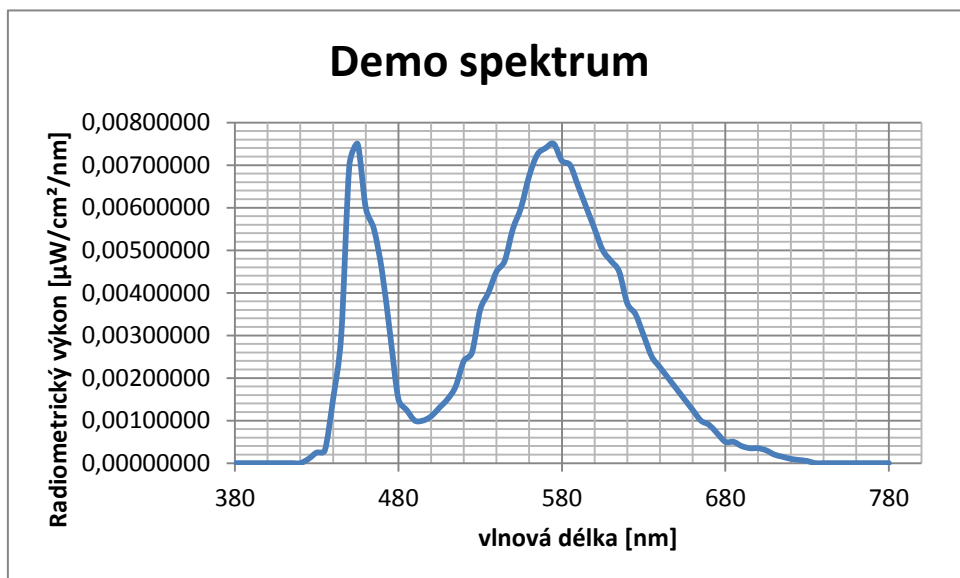
Z výpočtu FAR jasně vidíme, že pro potřeby rostlin nám nejhůře vychází zelené LED. Což jen potvrzuje logický předpoklad, že rostliny nejvíc odrážejí zelené světlo, protože jsou samy zelené a tudíž zelené světlo či zelenou složku bílého světla, potřebují jen minimálně. Jako druhé „nejhorší“ nám vychází modré spektrum, nejlepší parametry prokazuje bílé světlo.

Jak si můžeme všimnout, naše prototypové svítidlo nedisponuje spektrem červené barvy. Je to proto, že je konstruováno pro kvalitativní rozvoj rostlin. Spektrum červené barvy však podporuje především kvantitativní nárůst rostliny.

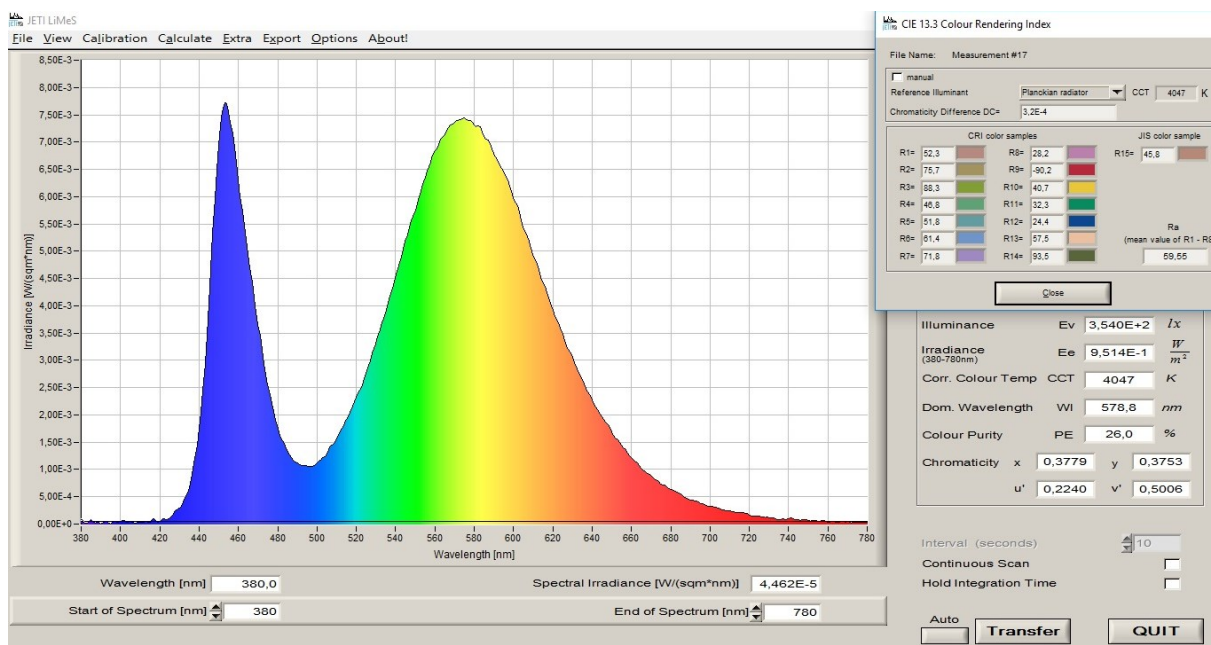
Níže se můžeme podívat na křivku spektrální charakteristiky, kterou mi vykreslil program Excel při přepočtu na $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Zde jsem tento přepočet udělala pro první měření spektrální charakteristiky bílých LED. Přepočet jsem prováděla tak, že jsem v určitých intervalech přiřazovala dané vlnové délce příslušný radiometrický výkon. Což jsem následně zadala do Excelu, který mi už z daných hodnot po přepočtu dle přednastaveného vzorce, dal výstup v $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a k tomu již zmíněnou křivku spektrální charakteristiky. Hodnota v $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ pro první měření bílých LED je $4,04 \cdot 10^{-14} \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

Bílá			
měření	U[V]	I[A]	λ
1.	18,66	0,08	578,8
2.	19,1	0,141	578,6
3.	19,48	0,192	578,5
4.	19,92	0,335	578,2
5.	20,26	0,408	578,2
6.	20,44	0,479	578
7.	20,76	0,586	577,9
8.	20,94	0,687	577,8
9.	21,24	0,856	577,6
10.	21,54	0,982	577,5

tab.1. měření spektrální charakteristiky bílých LED



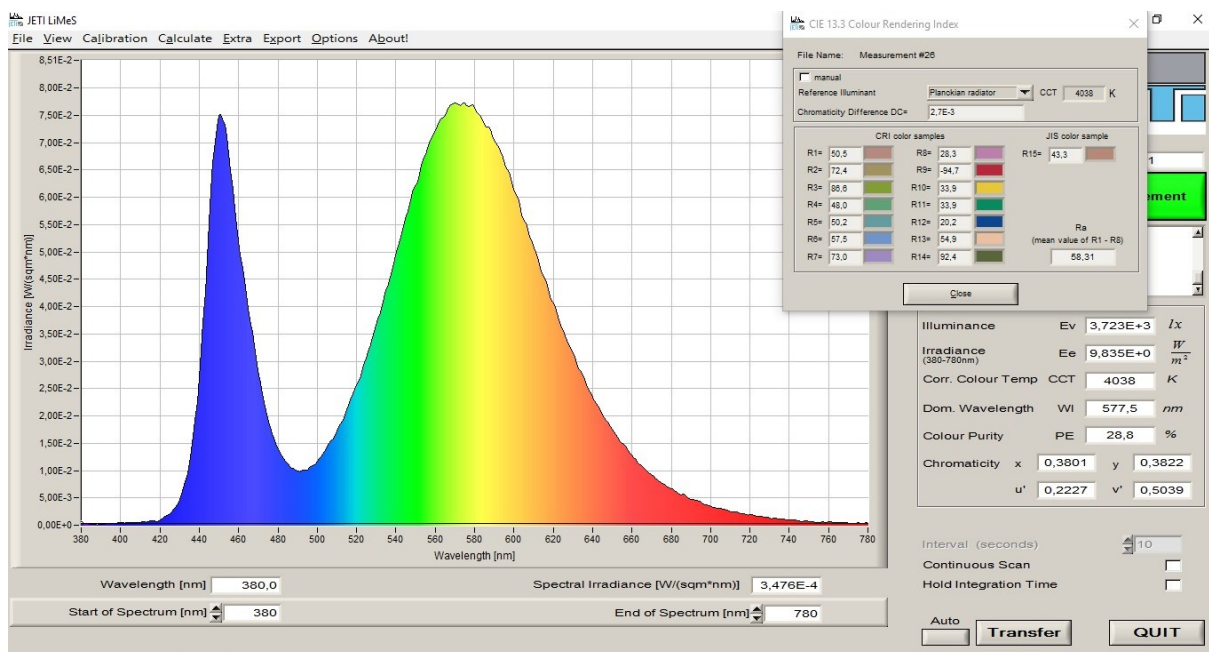
Obr. 14. křivka spektrální charakteristiky pro první měření na bílé LED



Obr.15 Spektrální charakteristika prvního měření na bílé LED

Pro porovnání změn, přidávám vždy kromě spektrální charakteristiky prvního měření také spektrální charakteristiku posledního měření, jak můžeme vidět změna je zde u bílých LED zcela nepatrná. Spektrální charakteristiky všech měření jsou obsaženy v příloze.

Měření fotosynteticky aktivního záření

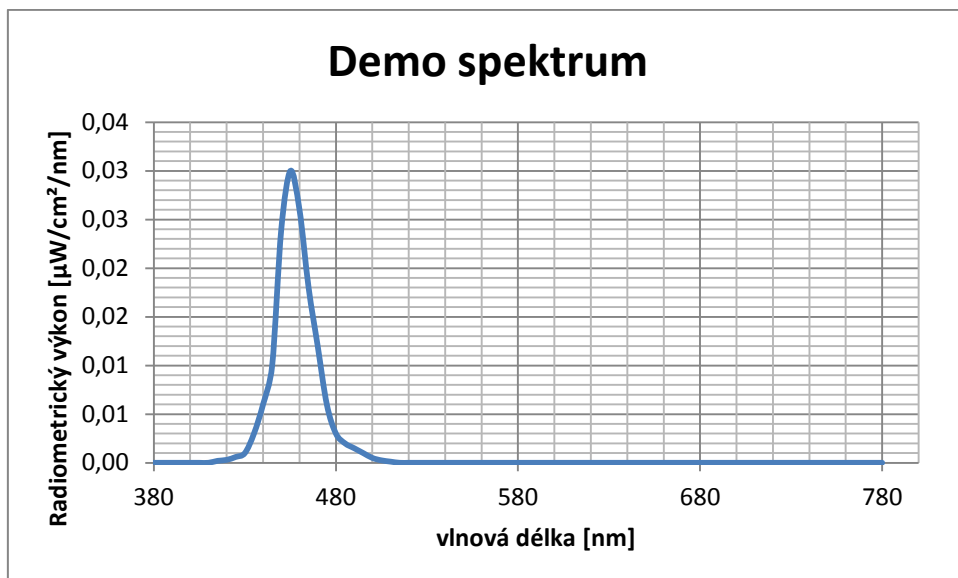


Obr.16 Spektrální charakteristika posledního měření na bílé LED

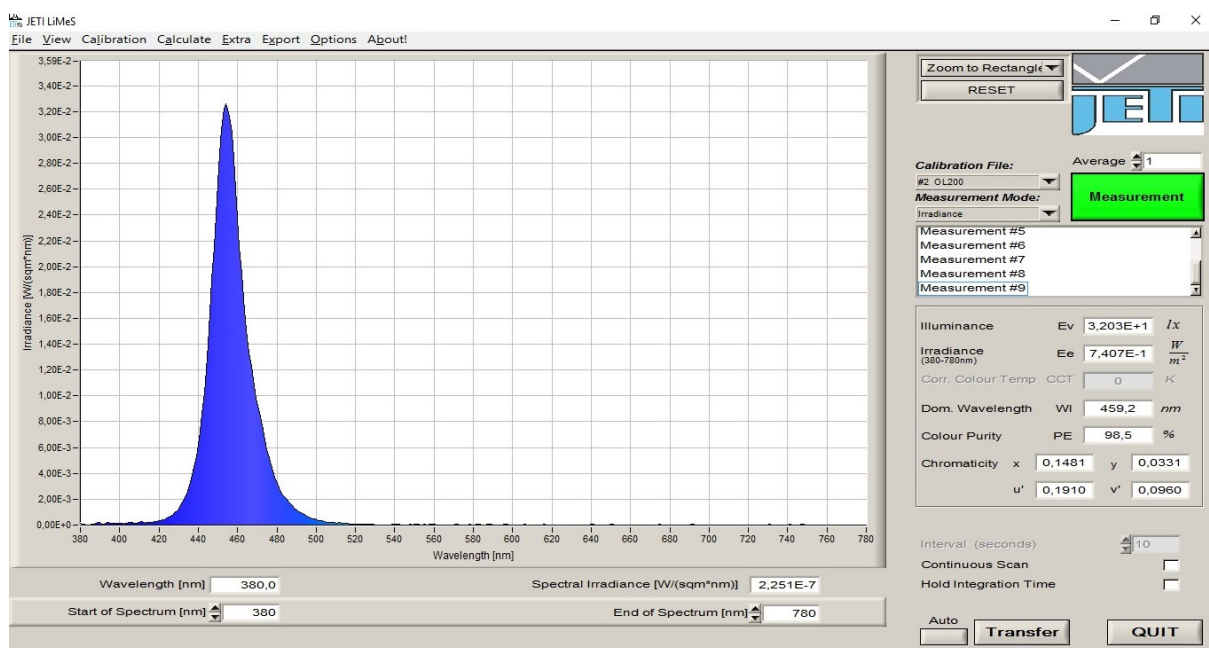
Modrá			
měření	U[V]	I[A]	λ
1.	18,08	0,101	459,2
2.	18,38	0,202	459
3.	18,86	0,372	458,5
4.	18,96	0,54	458,4
5.	19,04	0,608	458,3
6.	19,36	0,755	458,1
7.	19,48	0,845	458
8.	19,66	0,982	457,9

tab.2. měření spektrální charakteristiky modrých LED

Také pro modré LED jsem provedla přepočít na $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Opět přikládám křivku spektrální charakteristiky vykreslenou v Excelu. Přepočít na $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ v případě prvního měření modrých LED dává výsledek $3,8\cdot\text{E}-14 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

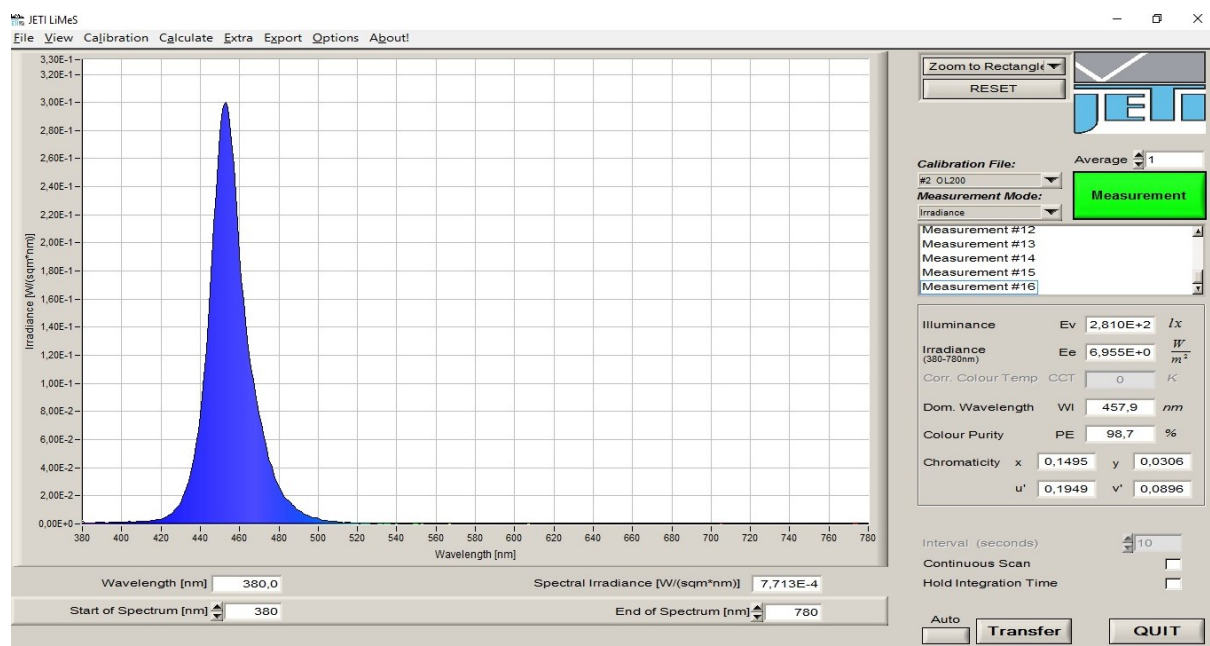


Obr.17 Křivka spektrální charakteristiky pro první měření na modré LED



Obr.18 Spektrální charakteristika prvního měření na modré LED

Měření fotosynteticky aktivního záření



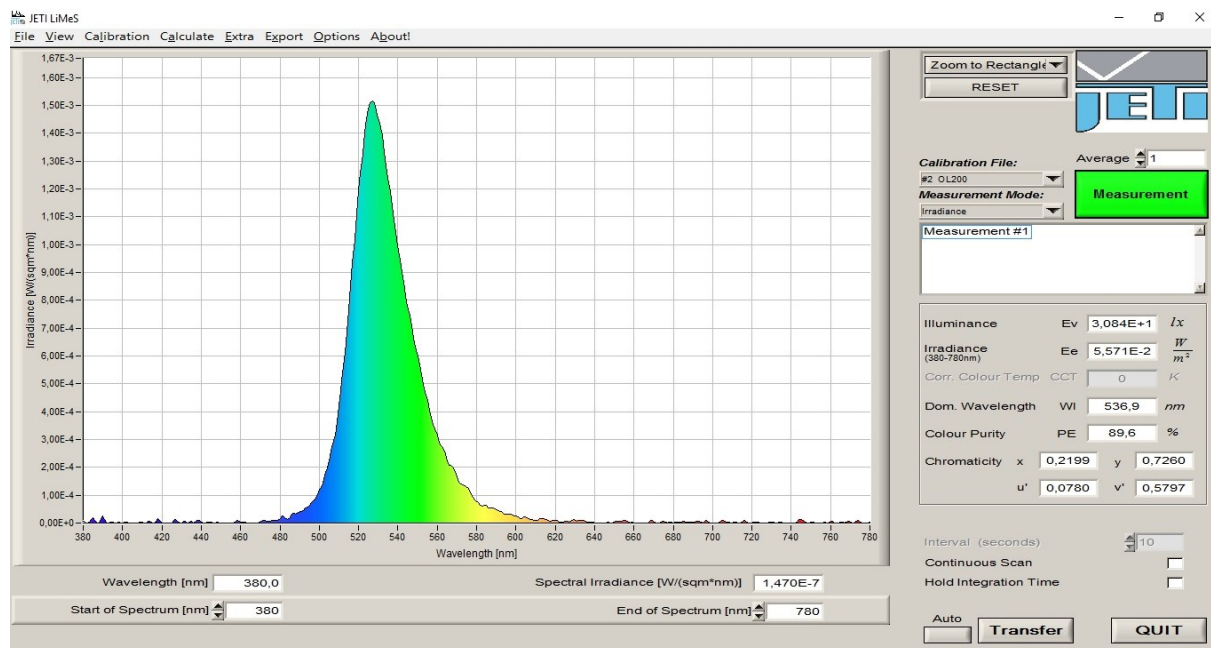
Obr.19 Spektrální charakteristika posledního měření na modré LED

Jako poslední uvádím přepočet na $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ u prvního měření zelených LED. Kde je výsledný přepočet roven $2,19\cdot 10^{-15} \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

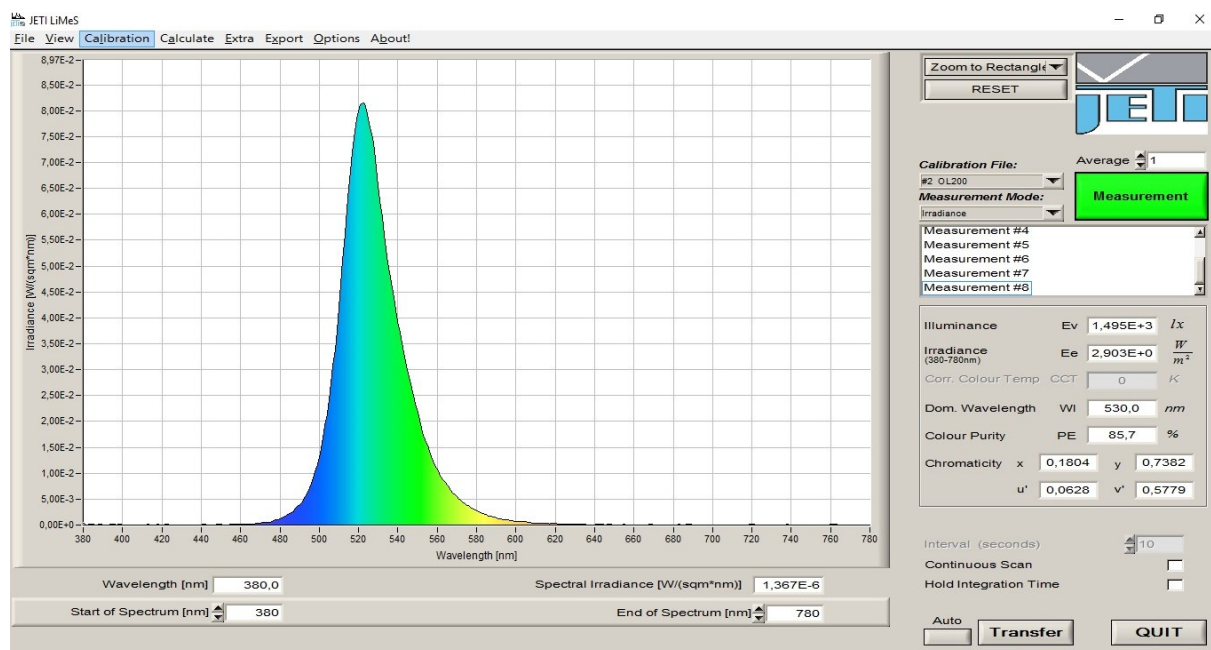
Zelená			
měření	U[V]	I[A]	λ
1.	16,14	0,043	536,9
2.	17,16	0,158	535,1
3.	17,66	0,265	534,1
4.	18,14	0,414	532,9
5.	18,64	0,611	531,7
6.	18,84	0,706	531,2
7.	19,16	0,86	530,5
8.	19,38	0,982	530

tab.3. měření spektrální charakteristiky zelených LED

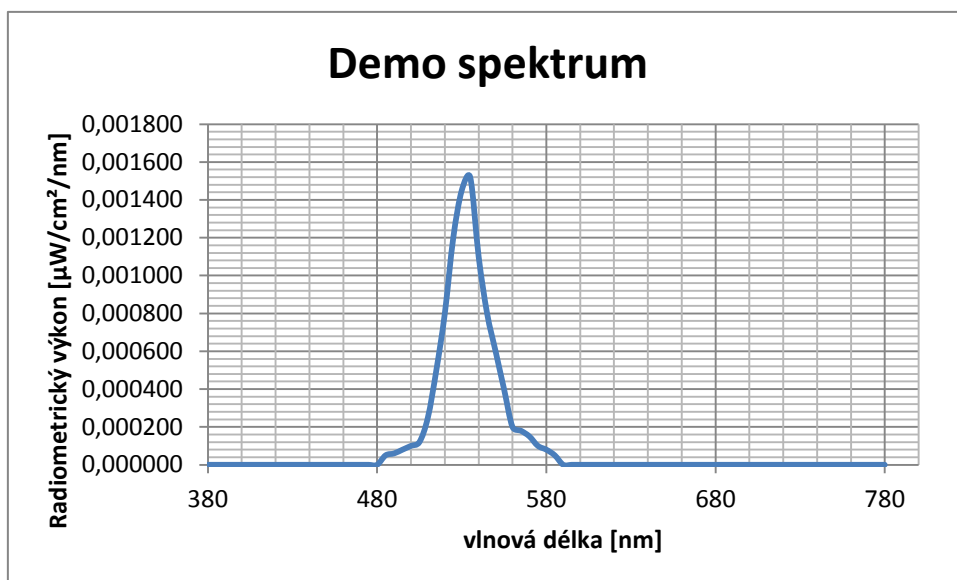
Měření fotosynteticky aktivního záření



Obr.20 Spektrální charakteristika posledního měření na zelené LED



Obr.21 Spektrální charakteristika posledního měření na zelené LED



Obr.22 Křivka spektrální charakteristiky prvního měření na zelené LED

	W/m ²	Lx [Lm/m ²]	μMol/s*m ²
zelená	5,57E-02	3,08E+01	2,19E-15
modrá	7,41E-01	3,20E+01	3,80E-14
bílá	9,51E-01	3,54E+02	4,04E-14

Tab 4. srovnání poměru jednotek

Pro lepší názornost, jsem si provedla převod do bezrozměrných jednotek (viz. tabulka níže), přičemž bílou LED jsem si zvolila jakožto vztažnou, ke které budu posuzovat modrou a zelenou LED. Jak si můžeme všimnout, modrá tím jak je na kraji, tak vychází pouze 9,05% a zelená 8,71%... Co je na tom ovšem podstatné, tak fakt že rostliny velmi dobře vstřebávají modré světlo (mají největší spektrální citlivost právě na okraji spektra viditelného záření), proto fotosynteticky aktivní záření vychází na 94,06% zatímco u zelené pouze 5,42% protože rostliny většinu zeleného světla odrazí. Světelnou energii zachycuje chlorofyl, který absorbuje červené a modré vlnové délky světla, ovšem zelené odráží.

	P -	fi -	FAR -
zelená	100	8,71	5,42
modrá	100	9,05	94,06
bílá	100	100	100

Tab.5. porovnávací tabulka po převodu na bezrozměrné jednotky

9 Závěr BP

V počátku práce se věnuji teoretickému úvodu o světle jako takovém, jeho vlastnostem, dále se v teoretické rovině zabývám působením světla na rostliny, s čímž souvisí i samotná fyziologie rostlin, z které vyvozujeme, jaké potřebné parametry musí svítidla splňovat, aby podporovaly růst a správný vývoj rostlin. V souvislosti se specifickými potřebami rostlin, které vyplývají ze skutečnosti, že spektrální citlivost je u rostlin jiná než při vnímání světla lidským okem, bylo tedy potřeba provést přepočet na jednotky fotosynteticky aktivního záření (FAR), kterými jsou $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Rostliny jsou nejvíce citlivé na fotosynteticky aktivní záření, což je záření o vlnových délkách v rozsahu od 400 nm do 700 nm. Velká spektrální citlivost rostlin je na krajích spektra viditelného záření. Jak mimo jiné vyšlo v praktickém měření, kde se mi potvrdily teoretické předpoklady a kde se tudíž prokázalo, že rostliny velmi dobře pohlcují modré světlo. Obdobné by to mělo být i s červeným světlem, kterým ovšem naše testované svítidlo nedisponuje. Červené světlo ovšem na rozdíl od modrého působí na rostlinu především tak, že podporuje její kvantitativní růst, ale mnohdy na úkor kvality. Z toho důvodu se i částečně upouští od užívání sodíkových výbojek ve sklenících, protože obsahují příliš mnoho červeného světla. Zelené světlo, mi vyšlo v praktickém měření „nejhůře“. Opět můžu říct, že se potvrdil teoretický předpoklad a jak už je jasné ze skutečnosti že rostlina je zelená, zelené světlo bývá z cca 94% odraženo. Bílé LED zajišťují určitou minimální potřebnou intenzitu v celém rozsahu spektra FAR, což samozřejmě také závisí na druhu rostliny, na fázi jejího vývoje a specifických požadavcích na intenzitu ozáření. Některým druhům rostlin postačuje ozáření menší než $40 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, zatímco jiné potřebují i nad $150 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Při návrhu skleníku v programu Relux jsem vycházela z výstupu měření, které byly pro mě směrodatné především pro určení osvětlenosti.

10 Literatura

- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] HABEL, J. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013
- [3] MĚŘENÍ SVĚTLA, Praktikum experimentálních metod fyziologie rostlin (KBF/PEMFR)
- [4] ŠULA, O. Příručka osvětlovací techniky. 2. vyd. SNTL, Praha 1979
- [5] Michal KRBAL, Petr BAXANT a Jan ŠKODA. Svítidla a světelné zdroje pro pěstování rostlin. Electric power engineering 2012.
- [6] Hladký L., Osvětlení z pohledu rostlin In: Časopis SVĚTLO [online].
[cit. 2017-03-01].
Dostupné z:
<http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/osvetleni-z-pohledu-rostlin--15564>
- [7] Sokanský, K.: Základy základů světelné techniky. VŠB, Ostrava 2007
- [8] Lux In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-01].
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lux_\(sv%C4%9Btlo\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lux_(sv%C4%9Btlo))
- [9] Lumen In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lumen>
- [10] Kandela In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kandela>
- [11] AUTOR NEUVEDEN. akamonitor.cz [online]. [cit. 2.2.2017]. Dostupný na WWW:
http://www.akamonitor.cz/articles/viz-komun-bar-kruh_soubory/image002.jpg
- [12] AUTOR NEUVEDEN. fotoroman.cz [online]. [cit. 2.2.2017]. Dostupný na WWW:
http://fotoroman.cz/tech2/light/rom_svetlo_1_02.gif
- [13] AUTOR NEUVEDEN. pocasicz.cz [online]. [cit. 2.2.2017].
Dostupný na WWW: http://www.pocasicz.cz/data/files/slunce_spektrum.jpg
- [14] AUTOR NEUVEDEN. www.rostlinna-akvaria.cz [online]. [cit. 2.2.2017].
Dostupný na WWW: <https://www.rostlinna-akvaria.cz/uploads/291-light%20spectrum.gif>
- [15] AUTOR NEUVEDEN. www.magazin-legalizace.cz [online]. [cit. 2.2.2017].
Dostupný na WWW:
<http://www.magazin-legalizace.cz/data/resized/files/magazin/05/nepruhledne-svetlo/800x600-6a23-text2.jpg>

[16] AUTOR NEUVEDEN. www.magazin-legalizace.cz [online]. [cit. 2.2.2017].

Dostupný na WWW: <http://www.magazin-legalizace.cz/data/resized/files/magazin/08-6-2011/fotos/nepruhledne-svetlo/800x600-4a03-tab.jpg>

[17] AUTOR NEUVEDEN. www.topkonstrukt.cz [online]. [cit. 2.2.2017].

Dostupný na WWW:

http://www.topkonstrukt.cz/media/grow_led_lampy_top_konstrukt_led_svitidla1.png

[19] Monochromatické záření In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia

Foundation, 2017 [cit. 2017-02-01].

Dostupné

z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Monochromatick%C3%A9_z%C3%A1r%C5%99en%C3%AD

[20] Sluneční energie In: Wikipedia: the free encyclopedia [online].

San Francisco (CA): Wikimedia

Foundation, 2017 [cit. 2017-02-01].

Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Slune%C4%8Dn%C3%AD_energie

[21] Sluneční konstanta In: Wikipedia: the free encyclopedia [online].

San Francisco (CA): Wikimedia

Foundation, 2017 [cit. 2017-02-01].

Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Slune%C4%8Dn%C3%AD_konstanta

Naměřené hodnoty

Příloha A: *Naměřené hodnoty*

Tabulka A.1: *Větší tabulka naměřených hodnot*

Tabulka A.2: *Jiná tabulka*

Velká tabulka na celou stránku

Příloha B: *Velká tabulka na celou stránku*

text							
